

植物蛋白功能特性及其在健康食品中的应用研究

方景明

北部湾大学, 广西 钦州 535011

[摘要] 植物蛋白具有溶解、乳化、起泡、凝胶、持水和组织化等功能, 是植物基饮品、肉制品替代物及营养食品的重要原料。本文从蛋白结构出发, 分析原料来源、提取方式和改性处理对功能特性的影响, 并讨论其健康食品应用。研究表明, 不同来源乃至同一原料不同批次的功能性能均可显著波动。植物蛋白产品开发应由单纯提高蛋白含量转向结构调控、氨基酸互补、消化利用、感官品质及安全性的协同优化。

[关键词] 植物蛋白; 功能特性; 健康食品; 结构调控

DOI: 10.64635/ja.2026.1572

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

Study on the Functional Properties of Plant Proteins and Their Applications in Health Foods

Fang Jingming

Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi 535011, China

Abstract: Plant proteins possess functional properties such as solubility, emulsification, foaming, gelation, water-holding capacity, and texturization, making them important ingredients in plant-based beverages, meat alternatives, and nutritional foods. Starting from protein structure, this study analyzes the effects of raw material sources, extraction methods, and modification treatments on functional properties, and discusses their applications in health foods. The results indicate that functional performance may vary significantly among different protein sources and even among different batches of the same raw material. The development of plant protein products should therefore shift from simply increasing protein content toward coordinated optimization of structural regulation, amino acid complementarity, digestibility and utilization, sensory quality, and safety.

Keywords: plant proteins; functional properties; health foods; structural regulation

引言

植物蛋白来源广泛, 主要分布于大豆、豌豆、蚕豆、鹰嘴豆、谷物、坚果及油料加工副产物中。除提供氨基酸外, 植物蛋白还能够在食品体系中发挥增稠、乳化、起泡、凝胶和组织构建作用。随着植物基饮食和食品资源高值化发展, 植物蛋白已由传统营养原料逐步转变为兼具营养与加工功能的食品结构单元。

天然植物蛋白存在溶解度低、豆腥味明显、氨基酸不平衡和批次差异大等问题。部分改性方法虽然可以提高乳化或凝胶性能, 却可能降低消化率或形成不良风味。因此, 研究重点应由单项性能强化转向结构、功能、营养和感官质量的综合调控。

1 植物蛋白的结构与功能基础

1.1 蛋白来源及结构差异

植物蛋白可根据溶解特性分为白蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白。豆类蛋白以球蛋白为主, 具有相对完整的球状结构, 分子表面同时分布亲水和疏水区域, 具备形成乳液界面膜的结构基础。小麦蛋白中的醇溶蛋白和谷蛋白可以形成具有黏弹性的连续网络,

适用于面制品及挤压组织化食品。大米和玉米蛋白疏水性较强, 水中分散性相对较差, 通常需要通过酶解或复合改性扩大应用范围。

大豆蛋白的乳化和凝胶性能较为成熟, 但部分人群需关注过敏风险。豌豆蛋白具有原料供应稳定、赖氨酸含量较高等特点, 已用于饮料、烘焙食品和运动营养产品。公开资料显示, 全球豌豆年产量约为 1350 万吨, 其蛋白酶抑制因子含量通常低于大豆, 但天然豌豆蛋白仍存在溶解性不足和豆腥味等问题^[1]。

植物蛋白的营养价值还受到限制氨基酸影响。谷物蛋白赖氨酸相对不足, 豆类蛋白中的含硫氨基酸相对不足。单一来源的高蛋白产品可能达到标签含量要求, 却不一定具有理想的氨基酸质量。豆类与谷物合理搭配能够形成互补, 但还需考虑消化率和实际摄入量。

1.2 主要加工功能特性

溶解性是植物蛋白发挥其他功能的基础。蛋白质只有充分分散在水相中, 才能较快向油水或气水界面迁移。多数豆类蛋白在接近等电状态时净电荷减少, 分子容易聚集沉淀, 导致饮料分层及乳化能力下降。

偏离该状态后, 分子间静电排斥增强, 通常有利于提高分散稳定性。

乳化性来源于蛋白质的两亲结构。疏水区域吸附于油相, 亲水区域朝向水相, 并在油滴表面形成界面膜。乳化活性反映蛋白形成新界面的能力, 乳化稳定性则反映乳液抵抗聚并、上浮和分层的能力。二者并不完全同步: 过度水解可提高扩散速度, 却可能因肽链过短而难以形成强韧界面膜。

蛋白质经适度加热后展开, 疏水作用、氢键和二硫键共同促进分子聚集, 形成三维凝胶网络。凝胶能够固定水和油, 决定豆腐、植物酸奶、植物肉及脂肪替代物的硬度、弹性和持水性。植物蛋白乳液凝胶还可在连续蛋白网络中包埋油滴, 用于模拟动物脂肪的外观和口感, 但目前仍存在凝胶偏软、贮藏稳定性不足等问题^[3]。

起泡性则要求蛋白迅速迁移至气水界面并形成具有黏弹性的薄膜, 适用于植物奶油、烘焙制品和充气甜品。持水性、持油性与蛋白结构中的亲水基团、疏水区域及孔隙网络有关, 可减少植物肉加工和加热过程中的水分流失。

2 植物蛋白功能特性的调控机制

2.1 提取工艺与原料条件

植物品种、种植环境、成熟度和贮藏条件会改变蛋白组分比例。即使来自同一种作物, 不同批次原料也可能表现出不同的溶解、乳化和起泡特性。一项针对 61 种商业植物蛋白配料的研究显示, 同一产品不同批次的功能指标相对波动最高可达 24%^[4]。原料标准化不足会导致实验室配方在工业生产中出现黏度、凝胶强度和乳液稳定性偏差。

干法分级主要依靠粉碎和气流分选富集蛋白, 能耗和用水量较低, 蛋白天然结构保留较多, 但纯度有限。湿法提取常采用碱溶、酸沉和离心等步骤, 可获得较高蛋白含量, 却可能使蛋白发生不可逆聚集。喷雾干燥温度过高还会降低复溶性。因此, 蛋白提取不应只追求得率和纯度, 还应保留与目标产品相匹配的界面活性和凝胶能力。

在上述 61 种商业配料中, 蛋白含量低于 50% 的产品被归为富蛋白粉, 50% 至 80% 为浓缩蛋白, 高于 80% 为分离蛋白。研究同时发现, 蛋白含量相近的产品仍可表现出完全不同的乳化和起泡性能^[4]。这说明纯度不是决定加工适用性的唯一指标。

2.2 物理、酶法及复合改性

超声、高压和脉冲电场等物理处理可使蛋白聚集

体解离, 暴露部分疏水基团和带电基团, 进而改善溶解、乳化和起泡性能。但处理强度过高时, 展开的蛋白可能重新聚集, 导致粒径增加。因此, 物理改性通常存在适宜处理区间, 不能以功率越高、时间越长作为工艺优化原则。

酶法改性通过有限水解降低分子质量, 能够改善难溶蛋白的分散性和消化可及性。水解程度过大则会削弱凝胶和界面成膜能力, 并可能暴露疏水氨基酸残基, 产生苦味。酶法处理应根据产品用途控制: 澄清饮料侧重溶解度, 小肽营养品侧重消化性, 植物肉和凝胶食品则需要保留足够的长肽链。

蛋白与多糖复合能够利用静电作用、氢键或共价连接构建更稳定的界面层。适量果胶、卡拉胶或可溶性膳食纤维可提高乳液黏度、减少油滴聚并, 并改善凝胶持水性。若多糖用量过高, 则可能引起相分离或掩盖蛋白之间的交联。复合改性需要同时控制蛋白与多糖比例、体系酸度、离子强度及热处理条件。

2.3 挤压组织化与凝胶网络构建

高水分挤压通过加热、剪切、加压和冷却, 使球状植物蛋白展开、定向排列并重新聚合, 形成类似肌肉纤维的层状结构。高水分挤压的物料含水率通常为 40% 至 80%, 所得产品最终水分含量高于 30%, 无需复水即可加工食用^[2]。

温度和水分对组织化程度具有显著影响。相关研究表明, 大豆蛋白挤压温度低于 120 摄氏度时, 结构成型较差; 在 140 至 150 摄氏度时组织化程度较高; 超过 160 摄氏度后可能出现表面裂纹、色泽加深和形态劣化^[2]。该范围并非所有蛋白的通用参数, 豌豆、花生和小麦蛋白的适宜条件会因蛋白组成及设备结构而改变。

在商业植物蛋白比较研究中, 不同配料的乳化能力从几乎不能乳化到每克配料稳定 737 毫升油相不等, 最高起泡活性达到 2278%, 且泡沫稳定性可达到 100%^[4]。如此大的性能跨度说明, 健康食品配方应按应用场景选择蛋白, 而不是仅依据“大豆蛋白”或“豌豆蛋白”等原料名称进行替换。

3 植物蛋白在健康食品中的应用

3.1 植物基饮品、肉制品替代物与营养食品

植物基饮品要求蛋白在中性或弱酸性体系中保持分散, 且经均质、杀菌和贮藏后不发生明显沉淀。大豆和豌豆蛋白可提供乳白外观和一定乳化能力, 燕麦、坚果及谷物成分则用于调节风味和黏度。酸性植物饮料可通过蛋白有限水解或蛋白多糖复合提高稳定性,

但必须控制苦味和粉感。

植物肉主要利用大豆、豌豆、小麦或蚕豆蛋白的凝胶与组织化能力。高水分挤压可形成纤维结构，蛋白乳液凝胶则可模拟脂肪颗粒。产品质量不能只追求接近肉类的硬度，还应综合评价咀嚼性、汁液保持、加热损失和消化率。若为改善风味和质地加入过多油脂、盐和精制淀粉，植物基产品不一定具有预期的健康优势。

在营养棒、运动营养粉和老年营养食品中，植物蛋白可与谷物蛋白复配，以改善必需氨基酸构成。针对老年人或消化能力较弱人群，可采用有限酶解和细化处理提高消化性。植物蛋白还可构建乳液、凝胶及微粒载体，用于包埋脂溶性维生素、多酚和益生菌，但载体的体外包埋率不能直接等同于人体吸收率。

健康效应主要取决于整体膳食替代关系，而非孤立的蛋白配料。包含 13 项随机对照试验和 7 项队列研究的系统评价显示，以植物蛋白替代部分动物蛋白后，总胆固醇平均降低 0.11 毫摩尔每升，低密度脂蛋白胆固醇平均降低 0.14 毫摩尔每升；但长期心血管疾病和糖尿病风险证据仅被评为有限提示性^[5]。因此，植物蛋白产品可以作为健康膳食的一部分，却不宜仅凭“植物来源”进行疾病预防宣传。

4 产品评价及产业化方向

4.1 营养、安全和感官质量评价

植物蛋白健康食品应建立四维评价体系。营养维度包括蛋白含量、必需氨基酸、限制氨基酸和消化率；加工维度包括溶解、乳化、凝胶、起泡及持水性；感官维度包括豆腥味、苦味、粉感、色泽和质地；安全维度则包括过敏原、微生物、农药残留、真菌毒素和加工污染物。

蛋白粉、浓缩蛋白和分离蛋白不应使用同一套功能评价条件。测试时需明确蛋白浓度、体系酸度、温度、盐含量和处理时间。针对植物饮料，应重点考察热稳定与沉降；针对植物肉，应增加纤维结构、持水率和加热损失；针对营养食品，还需评价体外消化、小肽释放和实际耐受性。

4.2 原料标准化及精准加工

产业化首先需要建立原料结构指纹和批次控制制度，至少记录蛋白纯度、组分比例、溶解度、粒径、表面电荷和变性程度。生产企业可根据目标产品建立

原料功能数据库，避免用不同批次配料直接等量替换。

未来应推动低耗水分级、温和提取、精准酶解和复合改性，并建立结构参数与最终产品性能的预测关系。植物蛋白产品还应重视全生命周期营养质量，避免在改善质构过程中出现钠含量过高、油脂品质下降或添加剂过多等问题。只有实现营养、感官、加工稳定和效率之间的平衡，才能形成具有持续市场价值的健康食品。

5 结语

植物蛋白的溶解性、乳化性、起泡性、凝胶性、持水性和组织化能力均由蛋白结构与加工环境共同决定。不同来源乃至同一产品不同批次之间存在明显性能差异，蛋白纯度不能单独代表应用价值。物理处理、有限酶解、蛋白多糖复合和高水分挤压能够拓展植物蛋白在饮品、植物肉、脂肪替代物和营养食品中的应用，但需防止过度加工引起聚集、苦味及营养损失。未来应以标准化原料、场景化功能评价和人体营养证据为基础，实现植物蛋白从高含量配料向高质量健康食品结构单元的转变。

【参考文献】

- [1] 周航, 肖彤, 解铁民. 豌豆蛋白的改性及其在食品中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 485-493.
- [2] 朱嵩, 刘丽, 张金闯, 等. 高水分挤压组织化植物蛋白品质调控及评价研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 293-299.
- [3] 朱秀清, 王子涵, 黄雨洋, 等. 植物蛋白基乳液凝胶脂肪替代物研究进展[J]. 食品科学, 2026, 47(4): 305-314.
- [4] Etzbach L, Gola S, Küllmer F, et al. Opportunities and Challenges of Plant Proteins as Functional Ingredients for Food Production[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2024, 121(50): e2319019121.
- [5] Lamberg-Allardt C, Bärebring L, Arnesen E K, et al. Animal versus Plant-Based Protein and Risk of Cardiovascular Disease and Type 2 Diabetes: A Systematic Review of Randomized Controlled Trials and Prospective Cohort Studies[J]. Food & Nutrition Research, 2023, 67: 9003.